



Utilisation d'un SIG pour le calcul de l'indice de symétrie des bassins versants : un outil de diagnostic de la croissance des rides anticlinales. Exemple du pli de Chandigarh (Siwaliks, Inde, Himalaya)

Jean-Michel Carozza, Bernard Delcaillau

► To cite this version:

Jean-Michel Carozza, Bernard Delcaillau. Utilisation d'un SIG pour le calcul de l'indice de symétrie des bassins versants : un outil de diagnostic de la croissance des rides anticlinales. Exemple du pli de Chandigarh (Siwaliks, Inde, Himalaya). Photo-Interprétation. European Journal of Applied Remote Sensing, 2006, 2, pp.15-19. halshs-01066702

HAL Id: halshs-01066702

<https://shs.hal.science/halshs-01066702>

Submitted on 22 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UTILISATION D'UN SIG POUR LE CALCUL DE L'INDICE DE SYMÉTRIE DES BASSINS VERSANTS : UN OUTIL DE DIAGNOSTIC DE LA CROISSANCE DES RIDES ANTICLINALES. EXEMPLE DU PLI DE CHANDIGARH (SIWALIKS, INDE, HIMALAYA)

Jean-Michel CAROZZA

Université L. Pasteur Strasbourg et GEODE – UMR 5602 CNRS, Toulouse

Bernard DELCAILLAU

Morphologie Côtière et Continentale – UMR 6143, Caen

RÉSUMÉ

La morphologie du drainage est un marqueur de la propagation latérale des anticlinaux. Dans ce travail, nous testons le potentiel de la symétrie du réseau hydrographique comme indicateur de la migration de la déformation. La symétrie du drainage est décrite par la méthode du vecteur de symétrie (Cox, 1994). Cette méthode est appliquée au pli de Chandigarh dont la croissance est liée au chevauchement frontal de l'Himalaya (Himalaya Frontal Thrust ou HFT). Elle montre que les bassins versants répondent morphologiquement à la propagation des anticlinaux par le développement d'asymétrie. Cependant, les contrôles structuraux sur les flancs anticlinaux (barres et chevrons) peuvent être déterminants dans la géométrie et l'organisation du réseau de drainage.

MOTS CLÉS

Croissance anticlinale, Siwaliks, Himalaya, Vecteur de symétrie, Drainage, Système d'Information Géographique, Modèle Numérique de Terrain.

Article remis le 12 juillet 2006, accepté définitivement le 24 août 2006.

INTRODUCTION

La propagation des failles constitue un mécanisme élémentaire de croissance des zones externes des fronts de chaînes actifs (Medwedeff, 1992 ; Whipple, 2004 ; Dorsey et Roering, 2005). Les travaux de Jackson *et al.* (1996) ont montré que le

cumul de la déformation sur une même faille devait se traduire par une augmentation de sa longueur. La détermination du sens de propagation et l'évaluation de la vitesse de déformation constituent aujourd'hui des enjeux de recherche majeurs de compréhension de la morphologie des plis. Depuis le milieu des années 1990, le développement de modèles de croissance des anticlinaux a bénéficié des apports de différents champs de recherche : i) modélisation numérique (Champel *et al.*, 2002) ; ii) données GPS (Sylvester, 1997) ; iii) analyse des géométries sédimentaires (Vergés *et al.*, 2002) et iv) analyse géomorphologique (Mueller & Talling, 1997 ; Jackson *et al.*, 1996 ; Benedetti *et al.*, 2000 ; Delcaillau *et al.*, 1998). En particulier, les modélisations numériques ont mis en évidence l'importance des couplages entre phénomènes tectoniques et processus de surface (Burbank et Anderson, 2000). La variété des structures géomorphologiques est ainsi le résultat combiné des géométries des chevauchements, des processus d'érosion et de la rétroaction de ces derniers sur la réactivation des chevauchements aveugles.

Dans de très nombreux cas, la propagation des structures n'est mis en évidence qu'indirectement par l'analyse géomorphologique (Leeder et Jackson, 1993 ; Jackson *et al.*, 1996 et Delcaillau *et al.*, 2006). Jackson *et al.* (1996) listent un ensemble de six critères qui peuvent être utilisés pour diagnostiquer la croissance de fronts segmentés : 1) diminution de la densité de drainage ; 2) diminution de l'altitude des vallées sèches antécédentes (*wind gap*) ; 3) diminution de l'altitude de la ligne de crête ; 4) développement d'anomalies de drainage ; 5) déformation de dépôts de plus en plus jeunes et 6) diminution de la rotation et de l'inclinaison de l'axe du pli. D'autres indices de pro-

pagation ont été testés avec succès notamment la variation de la pente longitudinale des cours d'eau conséquents drainant les flancs (Delcaillau *et al.*, 2006), la variation latérale de l'espacement du drainage (Hovius, 1996), la variation latérale de l'indice de sinuosité du front (Hack, 1973), la variation de l'indice d'élongation (Delcaillau, 2004), la variation de la valeur de l'intégrale hypsométrique des bassins (Carozza et Delcaillau, 2000) et l'asymétrie de vallée antécédentes. En plus de ces marqueurs purement morphologiques, les géométries des dépôts superficiels (cônes alluviaux et terrasses) peuvent également être utilisées comme des marqueurs quantitatifs (Pearce *et al.*, 2004 ; Soto *et al.*, 2005).

Dans cette note, nous étudions la relation entre la croissance des plis et l'évolution du drainage conséquent et en particulier l'utilisation de sa symétrie comme marqueur de la croissance latérale des plis. Des simulations numériques par automate cellulaire de développement du réseau hydrographique en contexte de soulèvement différentiel ont montré que le réseau hydrographique répond par une migration latérale orientée suivant la pente locale, c'est-à-dire perpendiculairement à l'axe de la faille (Rebeiro-Hargrave, 1999). Dans le cas des anticlinaux, la croissance des rides se traduit par le développement d'une pente locale orientée perpendiculairement à l'axe du pli et dans le sens de la croissance. En cours de croissance, les cours d'eau doivent donc migrer latéralement et induire la formation de bassins versants asymétriques (Delcaillau *et al.*, 2006). Les enjeux de ce travail sont donc : la mise au point d'une méthode de quantification de l'asymétrie des bassins versants adaptée et l'étude spatialisée de la réponse des bassins versants. En effet, pour être en conformité avec une interprétation structurale de propagation latérale des plis cylindriques, l'asymétrie doit décroître vers la ou les terminaisons les plus jeunes (migration unidirectionnelle ou bi-directionnelle). Pour cela, nous avons développé une méthode automatique de quantification de l'asymétrie et de spatialisée de cet indice. Nous appliquons cette démarche à l'interprétation structurale de la croissance de l'anticlinal de Chandigarh (Siwaliks, nord-ouest de l'Inde).

1. MÉTHODE ET DONNÉES

Différentes méthodes de quantification de l'asymétrie du drainage ont été proposées (pour une revue voir Keller et Pinter, 1996). Elles peuvent être regroupées en deux types principaux :

- Les méthodes de symétrie globale des bassins, basées sur le calcul des rapports d'aires à gauche et à droite du cours d'eau principal. Le facteur d'asymétrie (Af, Hare et Gardner, 1985)

est le plus communément utilisé. Il est donné par la formule suivante : $Af = Ar/Al$ où Af est le facteur d'asymétrie, Ar et Al les aires respectivement situées à droite et à gauche du cours d'eau principal, généralement le cours d'eau le plus long. L'avantage principal de cet indice est qu'il est très facile à calculer, manuellement ou automatiquement par l'utilisation d'un SIG. C'est un indice synthétique, qui caractérise l'ensemble du bassin versant et permet une comparaison entre bassins. Cependant, compte tenu de la fréquence des captures dans les domaines actifs, cet indice est très sensible aux évolutions locales du réseau hydrographique et sa signification structurale est donc limitée. Il existe d'autres variantes de cet indice, comme le profil aérographique. Cette représentation graphique de l'évolution amont-aval des surfaces drainées met en évidence les zones de confluences majeures, mais n'est pas adaptée à une comparaison de bassin à bassin.

- Les méthodes basées sur la symétrie locale de la vallée. Le vecteur de symétrie proposé par Cox (1994) est la méthode la plus commune. Elle est basée sur l'évaluation de la symétrie transversale en un point donné du cours d'eau (**Planche 1a, page 65**). Elle permet une analyse de la composante directionnelle (le sens de déflexion du drainage) et de l'intensité (magnitude) de la symétrie. La direction du vecteur de symétrie est donnée par la normale à la tangente du cours d'eau en un point et son module par le rapport entre la distance entre le cours d'eau et la ligne de partage des eaux respectivement à gauche et à droite (**Planche 1a, page 65**). Cette méthode permet une quantification stationnelle et non plus générale de l'asymétrie. De plus, elle permet d'appréhender les variations longitudinales de l'asymétrie, liée ou non à l'existence de captures. Ainsi, il est possible d'obtenir une information en plusieurs points d'un même cours d'eau selon un continuum amont-aval. D'autre part, elle permet d'appréhender finement la direction de l'asymétrie et de les comparer avec les données géomorphologiques et structurales.

Dans ce travail, nous avons développé un outil automatique de calcul du vecteur de symétrie basée sur la méthode de Cox, en utilisant un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Les données numériques utilisées ici sont issues de la base de données altimétriques SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Les caractéristiques techniques de l'acquisition, du post-traitement et des qualités géométriques sont détaillées dans Farr et Kobrick (2000). La résolution spatiale du MNT est d'environ 90 m et la précision verticale de l'ordre de 10 m. Compte-tenu de la taille de la ride anticlinale – ~ 50 km de long et 5 km de large – cette précision est suffisante pour une approche morphométrique des

bassins versants. Après comblement des artefacts (dépressions), le réseau hydrographique et les limites des bassins versants sont extraits grâce à un algorithme standard de type gravitaire. L'utilisateur détermine ensuite la fréquence de calcul du vecteur d'asymétrie (en nombre de pixels). Pour calculer l'azimut du vecteur d'asymétrie, il est d'abord nécessaire de généraliser le tracé de cours d'eau. Le tracé est ajusté par une approximation affine (**Planche 1a, page 65**). Le sens du vecteur d'asymétrie est déterminé par la valeur du rapport et la magnitude par la valeur absolue de ce même rapport.

En première approche, les tendances statistiques peuvent être analysées par la projection sur canevas de Schmidt (hémisphère inférieur, **Planche 1b, page 66**). La présence d'un basculement d'origine tectonique est marquée par la fréquence des asymétries et la polarisation dans des directions privilégiées. Une approche spatiale de l'asymétrie peut également être utilisée en intégrant les données d'asymétries dans un SIG. Les valeurs ponctuelles d'asymétrie peuvent être interpolées. La méthode d'interpolation utilisée est la méthode Inverse Distance weighted (IDW) car elle ne présuppose aucune hypothèse sur la nature de la distribution des données.

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

L'anticlinal de Chandigarh est localisé dans le sub-Himalaya indien, entre les rivières Satlej et Ghaggar (**Planche 2, page 67**). Il constitue une ride élémentaire associée au chevauchement frontal himalayen (HFT). Dans cette zone, la convergence entre les plaques eurasienne et indienne ont produit une série de chevauchements imbriqués d'échelle crustale : Chevauchement Central Principal (MCT), Chevauchement bordier (MBT) et Chevauchement Frontal Himalayen (HFT), qui délimite la plaque indienne (Schelling et Arita, 1991). L'activité du front tectonique a migré du MCT au HFT (Delcaillau, 1992). La ride anticlinale de Chandigarh constitue donc le relief le plus externe du piémont frontal des collines Siwaliks. Le Chevauchement frontal himalayen (HFT) qui sépare les collines Siwaliks de la plaine Indo-Gangétique est un chevauchement segmenté à vergence nord-est. L'analyse des images satellite LandSat ETM+ montre l'existence de structures linéaires obliques par rapport au front qui recourent le chevauchement frontal en différentes échelles chevauchantes (Delcaillau *et al.*, 2006). Ainsi, la terminaison nord de la ride de Chandigarh est limitée par un accident décrochant majeur, la faille de Satluj, qui limite la dépression longitudinale (*dun*) de Soan (Powers *et al.*, 1998 ; Malik *et al.*, 2003). Les rivières Ghaggar et Satlej, les deux

plus importantes du secteur, sont antécédentes et recoupent les reliefs associés au HFT. L'émergence en surface de ce chevauchement reste débattue (Nakata, 1989 ; Kumar *et al.*, in press). Les données de sub-surface montrent que le chevauchement frontal plonge doucement vers le nord et se branche sur un niveau de décollement dans les shales de la molasse cénozoïque de Dharamsala (Powers *et al.*, 1998). La géométrie et la profondeur de ce décollement contrôle la localisation des structures dans les collines Siwaliks (Wiltchko et Eastman, 1983).

Dans la zone frontale, le long de la rivière Ghaggar et autour de Chandigarh, des failles inverses parallèles au HFT, d'une longueur de 2 à 10 km affectent les terrasses quaternaires (Malik *et al.*, 2003). Les vitesses de déplacement estimées d'après l'âge des terrasses est de $1,6 \pm 0,1$ mm.an⁻¹. La géométrie des terrasses holocènes et historiques de la rivière Ghaggar suggère également une migration progressive de la déformation vers le sud-est, en relation avec la croissance latérale de la ride. Cette hypothèse semble confirmée par l'analyse de la symétrie du réseau hydrographique drainant la ride anticlinale.

L'anticlinal de Chandigarh, long de 40 km et large de 8 km est séparé des reliefs Siwaliks par le *dun* de Pinjore (**Planche 3, page 68**). La ride asymétrique culmine à une altitude de 596 m dans sa partie méridionale. Son flanc externe est long (6,75 km en moyenne) et sa pente est faible (3,5 %). Il s'oppose au flanc interne, plus court (1,40 km en moyenne) et à plus forte pente (12,6 %). Dans la zone frontale, le plongement des couches est supérieure à 40° et décroît régulièrement jusqu'au niveau de la charnière anticlinales. Sur le replat sommital de l'anticlinal, les pendages sont plus faibles, ~ 6 à 8°. La retombée anticlinale présente des valeurs de pendages, supérieures à 25°. Les forts pendages des séries conglomératiques des Siwaliks Supérieurs et l'alternance de niveaux conglomératiques et de bancs gréseux permettent une forte expression de l'érosion différentielle et le dégagement de barres rocheuses et de chevrons.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse de la réponse morphologique du réseau hydrographique a été étudiée sur le flanc externe de l'anticlinal de Chandigarh. Il montre une très forte asymétrie du réseau hydrographique polarisée autour des directions N130-N210 d'une part et N300-N350 d'autre part (**Planches 1b et 4, pages 65 et 69**). Les déviations en direction du SE sont majoritaires et représentent 57 % de l'ensemble des valeurs. Ces données semblent donc globalement compatibles avec une réponse du réseau hydrographique à une croissance du pli en direction du SE. Dans ce contexte, le développement d'une pente

locale orientée vers le SE pourrait être responsable de la migration progressive du réseau hydrographique en raison, soit du sapement latéral des cours d'eau sur le versant, soit en liaison avec une activité plus importante des processus de versant.

La spatialisation de l'indice d'asymétrie (**Planche 5, page 70**) montre toutefois une forte variabilité de la symétrie du réseau hydrographique qui draine le flanc externe de l'anticlinal. Trois zones peuvent ainsi être différenciées :

1. Dans la partie externe du pli, le réseau hydrographique est en cours de réorganisation (fixation des drains sur les cônes alluviaux en cours de surrection, développement d'un drainage perpendiculaire à l'axe du pli,...), notamment dans les terminaisons périclinales. Le réseau y est fortement asymétrique.
2. Dans la bordure externe de l'anticlinal au contact des zones déformées et de la plaine, le dégagement de chevrons et de barres en raison du fort pendage des couches ($> 20^\circ$) et d'un fort contraste lithologique est le facteur déterminant de l'organisation du drainage. Le réseau s'y développe principalement latéralement, en arrière des barres molassiques dures et est très symétrique. Les variations latérales de faciès et de résistance jouent un rôle prépondérant dans le développement d'un réseau hydrographique symétrique.
3. Dans la partie interne et jusqu'à la crête, l'importance de la surrection et du basculement différentiel prime sur le contrôle structural et l'asymétrie est alors fortement exprimée. La faible valeur des pendages ($< 8^\circ$) joue également comme facteur limitant à l'expression de l'érosion différentielle et facilite la réponse par migration latérale du réseau hydrographique.

Ces résultats sont conformes aux observations de terrain qui montrent la prédominance des formes structurales d'érosion dans la partie médiane de l'anticlinal. Dans cette zone, la réorganisation du réseau hydrographique est contrôlée par l'érosion différentielle de la série Siwalik supérieur. L'alternance de couches dures et de couches tendres (**Planche 3b, page 68**) est le facteur dominant de l'organisation du drainage de la ride et du développement des bassins versants élémentaires. La plus ou moins grande symétrie de ces bassins est difficile à interpréter en terme de propagation de la ride. D'autre part, les terminaisons périclinales montrent des bassins versants très asymétriques. Leur géométrie est compatible avec une propagation vers le SE et le NW de la déformation. Cette observation est en accord avec les données de terrain, qui montrent une migration des corps alluviaux des rivières Satlej et Ghaggar.

Cependant, les données de symétrie des bassins versants, qui constituent un indicateur fréquem-

ment utilisé pour inférer la propagation des plis, doivent être manipulées avec prudence. A l'intérieur d'un même système chevauchant, la symétrie des bassins est fortement affectée non seulement par les paramètres tectoniques qui contrôlent le système de pente locale et les possibilités de migration latérale, mais aussi par les facteurs lithologiques et l'apparition de formes d'érosion qui contrôlent le drainage à des échelles de 1 à 5 km?. Ces facteurs déterminent la réorganisation du réseau hydrographique local et peuvent conduire à masquer la signature du signal tectonique à l'échelle de la ride. Il est donc nécessaire de considérer la dimension spatiale de l'asymétrie et de son organisation plus que le seul aspect statistique à l'échelle de la ride. Dans le cas de l'anticlinal de Chandigarh, la cohérence entre données structurales, données géomorphologiques et données géomorphométriques sur la symétrie des bassins s'accordent pour interpréter cette dernière comme la signature de la croissance de la ride anticlinale.

RÉFÉRENCES

- BENEDETTI L. TAPPONNIER P. KING G.C.P. MEYER B. MANIGHETTI I. 2000. Growth folding and active thrusting in the Montello region, Veneto, northern Italy. *J. Geophys. Research.* **105**, NO B1, 739-766.
- BURBANK DW et ANDERSON R.S. 2000. *Tectonic Geomorphology*, Blackwell Science: 1-274 pp.
- CAROZZA J-M et DELCAILLAU B. 2000. Réponse des bassins versants à l'activité tectonique : l'exemple de la terminaison orientale de la chaîne pyrénéenne. *Approche morphotectonique. Géomorphologie.* **1**, 45-60.
- CHAMPEL B. VAN DER BEEK P. MUGNIER J-L. et LETURMY P. 2002. Growth and lateral propagation of fault-related folds in the Siwaliks of western Nepal : Rates, mechanisms and geomorphic signature. *J. Geophys. Research.* **107**, B6, 101029.
- COX R.T. 1994. Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. *Geol. Soc. Am. Bull.* **106**, 571-581.
- DELCAILLAU B., 1992. *Le piedmont des Siwaliks de l'Himalaya*. CNRS Edit., 272 p.
- DELCAILLAU B., 2004. Reliefs et tectonique récente. *Vuibert*, 259 p.
- DELCAILLAU B., CAROZZA J-M. et LAVILLE E. 2006. Recent fold growth and drainage development : The Janauri and Chandigarh anticlines in the Siwaliks foothills, northwest India. *Geomorphology*. In press.
- DELCAILLAU B., DEFFONTAINES B., ANGELIER J., DÉRAMOND J., FLOISSAC L., SOUQUET P. et CHU H. T. 1998. Morphotectonic evidence from late-

- ral propagation of an active frontal fold ; the Pakuashan anticline, foothills of Taiwan. *Geomorphology*. **24**, 263-290.
- DORSEY R.J. et ROERING J.J. 2005. Quaternary landscape evolution in the San Jacinto fault zone, Peninsular Ranges of Southern California: Transient response to strike-slip fault initiation. *Geomorphology*. **73**, 16-32.
- FARR T.G. et KOBRICK M. 2000. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *Amer. Geophys. Union Eos*. **81**, 583-585.
- HACK H.T. 1973. Stream-profile analysis and stream gradient-index. *J. Res. U.S.G.S.* **1**, 4, 421-429.
- HARE P.W. et GARDNER T.W. 1985. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. In *Tectonic Geomorphology*. Edité par M. Morisawa et J.T. Hack, Allen et Unwin (Boston) 75-104.
- HOVIUS N. 1996. Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts, *Basin Res.*, **8**, 29-44.
- JACKSON J. NORRIS R. et YOUNGSON J. 1996. The structural evolution of active fault and fold systems in central Otago, New Zealand : evidence related to drainage patterns. *J. Struct. Geol.* **18**, 217-234.
- KELLER E.A. et PINTER N. 2002. *Active tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*, Second Edition: Upper Saddle River. Prentice Hall, (New-Jersey) 362 pp.
- KUMAR S. WESNOUSKY S. G. ROCKWELL T. K. BRIGGS R. W. THAKUR V. C. et R. JAYANGONDAPERUMAL 2005. Paleoseismic evidence of great surface-rupture earthquakes along the Indian Himalaya. *Journal of Geophysical Research*, in press.
- KUMARAVAL V. SANGODE S.J. KUMAR R. et SIVA SIDDIAIAH N. 2005. Magnetic polarity stratigraphy of Plio-Pleistocene Pinjor Formation (type locality), Siwalik Group, NW Himalaya, India. *Current Science*, **88**, 9, 1453-1462.
- LEEDER M.R. et JACKSON J.A. 1993. The interaction between normal faulting and drainage in active extensional basins, with examples from the western United States and central Greece. *Basin Research*. **5**, 79-102.
- MALIK J.N., NAKATA T., PHILIP H. et VIRDI N.S. 2003. Preliminary observations from a trench near Chandigarh, NW Himalaya and their bearing on active faulting. *Current Science*. **85**, 12, 1793-1798.
- MEDWEDEFF D. A. 1992. Geometry and kinematics of an active, laterally propagating wedge thrust, Wheeler Ridge, California. *Structural geology of fold and thrust belts.*, Johns Hopkins University Press (Baltimore), 3-28.
- MUELLER K. et TALLING P. 1997. Geomorphic evidence for tears faults accommodating lateral propagation of an active fault-bend fold, Wheeler Ridge, California. *J. Struct. Geol.* **19**, 3-4, 397-411.
- NAKATA T. 1989. Active faults of the Himalaya of India and Nepal. In *Tectonics of the Western Himalayas*. Edité par Malinconico, L.L., Lillie, R.L. Geological Society of America Paper. **232**, 243- 264.
- PEARCE S.A., PAZZAGLIA F.J. et EPPES M.C. 2004. Ephemeral stream response to growing folds. *Geol. Soc. Am. Bull.* **116**, 9-10, 1223-1239.
- POWERS P.M., LILLIE R.J. et YEATS R.S. 1998. Structure and shortening of the Kangra and Dehra Dun reentrants, Sub-Himalaya, India. *GSA Bulletin*. **110**, 8, 1010- 1027.
- REBEIRO-HARGRAVE A. 1999. - Large scale modelling of drainage evolution in tectonically active asymmetric intermontane basins using cellular automata, *Z. für Geomorph.* **118**, 121-134.
- SCHELLING D. et ARITA K. 1991. Thrust tectonics, crustal shortening, and the structure of the far-eastern Nepal Himalaya. *Tectonic.* **10**, 5, 851-862.
- SOTO R., MARTINOD J., RIQUELME R., HÉRAIL G. et AUDIN L. 2005. Using geomorphological markers to discriminate Neogene tectonic activity in the Precordillera of North Chilean forearc (24-25°S). *Tectonophysics*, **411**, 1-4, 41-55.
- SYLVESTER A.G. 1997. Aseismic growth of Ventura Avenue anticline (1978 to 1997): Evidence of anelastic strain release in Ventura basin, southern California, from precise leveling. *Transactions Amer. Geophys. Union*, **78**, F156-157.
- VERGÉS J. MARZO M. et MUÑOZ J.A. 2002. Growth strata in foreland settings. *Sed. Geol.*, **146**, 1-9.
- WHIPPLE K.X. 2004. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **32**, 151-185.
- WILTSCHKO D.V. et Eastman D. 1983. Role of basement warps and faults in localizing thrust fault ramps. In: *Contributions to the Tectonics and Geophysics of Mountain Chains*. Edité par Hatcher, R.D. Williams et H., Zeitz, I. Geological Society of America Memoir, **158**, 177-190.